

Application du développement en X, l'exemple du régulateur de pression revisité.

J. Vareille, M. Tahan, P. Le Parc

Lisyc Laboratoire Informatique des Systèmes Complexes (EA 3883)

UEB, UBO, 20 avenue Le Gorgeu 29200 BREST

jean.vareille@univ-brest.fr, mehdi.tahan@gmail.com, philippe.le-parc@univ-brest.fr

Résumé :

La méthode de développement en X tient compte du fait que les éléments de tout système technique sont issus de ressources puisées dans l'environnement. En appliquant cette méthode l'article revisite le cas d'école du régulateur de pression et explique comment le matériau constitutif du corps principal du régulateur peut être sélectionné dès la première interprétation du cahier des charges, avant toute recherche de solution ou définition géométrique des composants. Pour cela le problème est énoncé dans son contexte en tant que « supersystème », puis la théorie de la similitude et l'analyse dimensionnelle sont utilisées afin de retrouver des indices de performance d'Ashby permettant un choix raisonné.

Abstract:

The X-development method takes into account that the elements of any technical system are made of resources extracted from the environment. Starting from this idea, this article revisits the example of the pressure regulator and explains how the appropriate material to make the main body of the regulator may be selected from the statements written in the requirements before any research of solution or geometric definition of components. The problem is stated in context as a "super-system" then the similarity theory and dimensional analysis are used to find the Ashby's performance indices in order to perform a reasoned choice.

Mots clefs : méthode de développement, CAO-PLM, gestion du cycle de vie, éco-conception.

1 Introduction

En ingénierie système la préconception est l'activité qui précède la conception. Les décisions majeures qui engagent les coûts globaux de conception, de réalisation et d'utilisation sont prises lors de la préconception d'un système technique. Or seuls le cahier des charges et l'état de l'art sont alors connus. Le nombre d'inconnues dépasse largement le nombre de paramètres, d'équations et d'inéquations, ce qui empêche d'utiliser les méthodes mathématiques conventionnelles. Par conséquent il faut recourir à des méthodes heuristiques pour effectuer les premiers choix déterminants.

Les éléments matériels de tout système sont issus de l'environnement, le développement du système sera accompli en interaction avec l'environnement, ainsi que son utilisation, et, en fin de vie, ses éléments y seront rejetés ou valorisés. Par conséquent l'environnement constitue le paramètre majeur du problème. Le cahier des charges se doit de préciser les contextes d'utilisation du système et les interactions qui existent avec son environnement.

Dans la prochaine section nous décrivons brièvement deux méthodes de préconception, l'une basée sur l'environnement, l'autre sur l'analyse dimensionnelle, puis en quelques mots la méthode de sélection des matériaux basée sur des indices de performance [1]. Dans la section trois nous rappelons les éléments principaux de la méthode de développement en X [2], qui repose sur l'omniprésence de l'environnement, et proposons nos heuristiques. Dans la section 4 nous revisitons le cas d'école du régulateur de pression [3].

2 Méthodologies de préconception

La méthode de conception basée sur l'environnement "Environment Based Design" [4] (EBD) proposée en 2004 et développée depuis par Yong Zeng est axiomatique. Elle est fondée sur l'idée que tous les éléments matériels du système à concevoir seront nécessairement extraits de l'environnement, que ce système sera en interaction avec son environnement et qu'après usage il sera valorisé ou restitué à l'environnement. Le but du système à concevoir est de modifier une interaction entre des éléments qui lui sont extérieurs, donc dans son environnement, en employant des éléments constitutifs, ou qui le traversent, puisés dans l'environnement. Le résultat de la conception modifie l'environnement en y changeant des interactions. L'environnement est la seule chose qui demeure et sur laquelle la conception peut s'appuyer. Mais la conception est une activité au cours de laquelle des choix sont effectués alors qu'on ne dispose jamais du nombre de données suffisantes pour employer des méthodes purement mathématiques ou de logique déductive. Pour Yong Zeng la logique du concepteur est spécifique. La méthode EBD a pour ambition de l'imiter par des programmes d'intelligence artificielle afin d'enchaîner automatiquement les prises de décision.

L'application de l'analyse dimensionnelle à la préconception a été étudiée par Eric Coatanéa lors de sa thèse [5]. Cette méthodologie permet de diminuer le nombre de variables et de paramètres, de réduire les systèmes d'expressions à manipuler et de mettre en évidence des corrélations entre des facteurs sans dimension facilement utilisables pour des extrapolations. Les nombres adimensionnels sont équivalents entre eux en termes de topologie et de métrique. Néanmoins elle ne permet d'effectuer des choix, ni ne donne d'ordre dans lequel ils doivent être opérés.

La méthode d'Ashby [1] de sélection des matériaux selon des indices de performance peut être résumée de la façon suivante. Soit l'ensemble des performances $\{P\}$ d'un système technique composé d'objets matériels de géométrie $\{G\}$ et dont les combinaisons des propriétés des matériaux sont $\{M(p)\}$, soumis à un ensemble de contraintes $\{F\}$: le système (1) exprime que les performances résultent des choix de formes, de dimensions, de matériaux et des contraintes. Nous y utilisons l'affectation « $:=$ » car $\{P\}$ résulte des choix effectués.

$$\{P\} := f \{F, G, M(p)\} \quad (1)$$

L'hypothèse proposée par M. Ashby est celle de la séparabilité de la fonction f , d'où la formulation (2).

$$\{P\} := f_1 \{F\} f_2 \{G\} f_3 \{M(p)\} \quad (2)$$

Celle-ci suggère que les problèmes géométriques et ceux de choix de matériaux peuvent être résolus séparément. En effet des pièces de géométrie identique jouant le même rôle fonctionnel peuvent être réalisées en des matériaux doués de propriétés différentes.

À la fin de la prochaine section nous reviendrons sur la séparabilité et l'analyse dimensionnelle.

3 La méthode de développement en X

Cette méthode présentée schématiquement sur la figure 1 propose de fusionner la méthode en cascade, le cycle en V et la méthode 2TUP [6], de donner des places également à de nombreuses autres méthodes comme TRIZ [7], celle de sélection des matériaux selon des indices de performance [1], etc. Le schéma est traversé horizontalement par la ligne du temps, en dessous se trouve le domaine de ce qui est matériel, au-dessus celui de l'immatériel : les données, les logiciels, les informations. L'étude commence par une idée, ou bien par l'expression d'un besoin, en général rédigée en un document qui contient des intentions, du langage naturel sans dimension physique, des pourcentages, etc. Selon la méthode en X l'équipe chargée du développement doit en premier lieu préciser quels sont les cas d'utilisation et les environnements d'usage du système et toutes les grandeurs physiques, chimiques et biologiques influentes. Elle doit mener de front deux tâches, l'une dans un espace abstrait où elle manipule des variables et des paramètres sans dimension et l'autre dans le monde matériel où elle emploie des variables et des paramètres dimensionnés.

Le système étudié sera composé d'éléments matériels puisés dans l'environnement. Comme il est plus efficace d'enchaîner étude et réalisation sans temps d'arrêt, il est judicieux de choisir les matériaux des pièces non standard et les quantités nécessaires, avant d'en avoir défini exactement les formes et dimensions. L'étude pourra continuer parallèlement à l'approvisionnement (collecte) en matériaux bruts et outillages, sauf les outils de forme. Le schéma peut être compris comme un PERT, chaque branche est une tâche. Le point central de synchronisation est franchi lorsque la définition est achevée, du moins suffisante, pour pouvoir lancer la production. Les échanges d'informations entre les tâches ne sont pas représentés sur la figure 1.

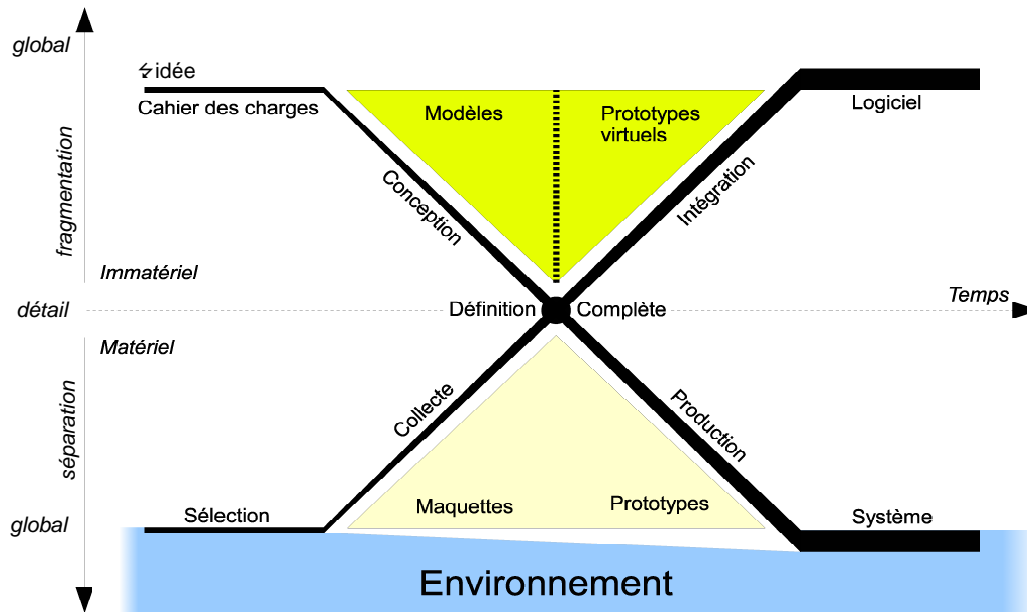


FIG. 1 – Schéma général du développement en X

L'analyse dimensionnelle est la méthode retenue pour associer au problème matériel réel sa formulation abstraite (immatérielle). Elle permet de justifier partiellement la séparabilité vue dans l'expression (2). Les contraintes $\{F\}$ sont soit sans dimension Δ comme des angles ou des pourcentages, soit homogènes à des longueurs L , soit font intervenir d'autres dimensions que la longueur : M, T, θ, I, I_v, n . Dans ce dernier cas la géométrie des pièces seule ne permet pas de faire face à ces contraintes, c'est le rôle des propriétés des matières solides et de fluides d'y répondre. Par conséquent $\{F\}$ est séparable en 2 parties, d'un côté celles qui sont adimensionnelles ou homogènes à L , la longueur, qui peuvent être résolues par la géométrie, de l'autre, celles qui font intervenir d'autres dimensions M, T, θ, I, I_v, n , qui obligent alors l'usage de matières adaptées.

Comme les propriétés des matériaux sont discontinues, voir figure 4, nous proposons de choisir en premier les matériaux convenables au regard des contraintes, puis de choisir l'architecture cinématique et enfin de décider des formes et des dimensions des pièces, car les variables associées sont continues et correspondent à des problèmes souvent linéarisables. La séquence (3) exprime l'ordre dans lequel nous proposons de traiter les problèmes de conception, jusqu'à l'évaluation des performances de la solution complètement définie.

$$\boxed{\text{séparer } \{F\} \text{ en } \{F'(M, T, \theta, I, I_v, n)\} \cup \{F''(\Delta, L)\}} \rightarrow \boxed{\text{résoudre } \{M(p)\}} \rightarrow \boxed{\text{définir } \{G\}} \rightarrow \boxed{\text{évaluer } \{P\}} \quad (3)$$

Un tel ordre est susceptible de réduire la liberté de recherche des solutions, c'est pourquoi les bureaux d'études préfèrent traiter simultanément les tâches de résolution et de définition. Dans la suite de l'article nous présentons un exemple de démarrage d'une conception « à partir de rien ».

4 Application au cas d'école du régulateur de pression

Les heuristiques induites par la méthode de développement en X peuvent être appliquées à l'étude du cas d'école du régulateur de pression [3]. Notre premier objectif est de montrer comment le problème peut être posé dans son environnement physique puis être abstrait en appliquant l'analyse dimensionnelle. Ensuite nous mettrons en évidence des indices de performance qui permettront d'effectuer une sélection de plusieurs familles de matériaux, candidates à la réalisation du corps principal du régulateur.

La première étape consiste à collecter les informations connues. Dans le cas présent nous savons que le besoin consiste à délivrer un débit volumique de fluide Q à une pression constante (P_{out}) en sortie du dispositif, quelles que soient les variations de pression à l'entrée (P_{in}). Le dispositif a une masse M , il occupe un volume V , a une durée de vie L_{10} . Nous supposons que le cahier des charges précise quel fluide traverse le régulateur et ses caractéristiques, son état P_{in} et θ sa température en Kelvin, la plage de réglage de la pression de sortie constante et le débit maximal souhaité. Nous supposons que $P_{\text{in}} > P_{\text{out}}$.

Comme la densité d'énergie mécanique potentielle associée à la pression du fluide diminue entre l'entrée et la sortie, la différence est transformée en chaleur, car la viscosité du fluide dissipe l'énergie cinétique de

petits tourbillons qui se créent au passage de l'écoulement au travers d'un étranglement de taille variable. Ce dernier est isenthalpique, l'application du principe de conservation de l'énergie (premier principe) écrit en termes de puissance, en négligeant les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de gravité, donne l'expression (4), où \dot{S} est le flux d'entropie en Joule par Kelvin et par seconde.

$$Q P_{in} - Q P_{out} - \dot{S} \theta = 0 \text{ Watt} \quad (4)$$

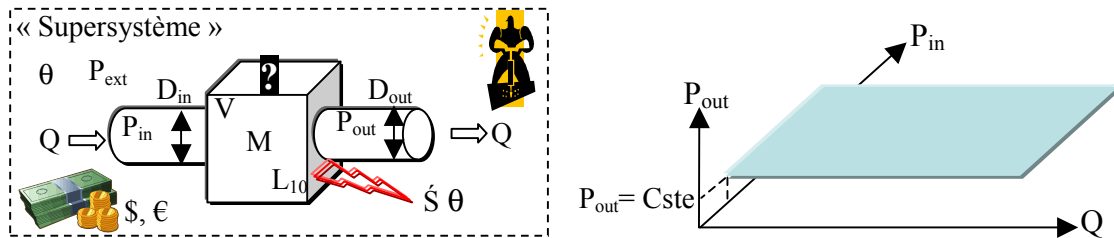


FIG. 2 – Schéma d'analyse du régulateur de pression à gauche et de son comportement attendu à droite.

Le schéma à gauche de la figure 2 représente le « supersystème » composé du système à concevoir ? et de son environnement proche. Les objectifs du concepteur sont :

- d'obtenir une pression de sortie constante P_{out} malgré les variations de pression à l'entrée P_{in} , tant que $P_{in} > P_{out}$, voir le graphe à droite de la figure 2 qui représente le comportement attendu,
- de minimiser la masse, le volume occupé et le coût de l'appareil autant que possible, mais en respectant la condition économique « vertueuse » : coût < prix < valeur d'estime.

	P_{ext}	P_{in}	P_{out}	D_{in}	D_{out}	Q	M	V	θ	\dot{S}	L_{10}
L	-1	-1	-1	1	1	3		3		2	
M	1	1	1				1			1	
T	-2	-2	-2			-1				-3	1
θ									1	-1	

Tableau. 1 – Tableau aux dimensions de l'analyse dimensionnelle globale.

Les données de base sont en caractères gras dans le tableau 1. À partir des 11 variables et paramètres initiaux et leurs quatre dimensions physiques indépendantes, nous tirons 7 variables ou nombres adimensionnels $\Pi_{1,2}$

$$\Pi_1 = \frac{P_{in}}{P_{ext}} \quad \Pi_2 = \frac{P_{out}}{P_{ext}} \quad \Pi_3 = \frac{D_{out}}{D_{in}} \quad \Pi_4 = \frac{M Q^2}{P_{ext} (D_{in})^7} \quad \Pi_5 = \frac{V}{D_{in}^3} \quad \Pi_6 = \frac{\dot{S} \theta M}{(P_{ext})^{3/2} (D_{in})^{7/2}} \quad \Pi_7 = \frac{D_{in} P_{ext} L_{10}}{M}$$

Nous pouvons appliquer le théorème de Vashy-Buckingham et transformer le problème en n'utilisant plus que les variables et nombres adimensionnels, cela amène à la formulation (5). Nous disposons dès lors d'un système d'expressions déduit du système initial avec un nombre diminué de variables et de paramètres.

$$\{ \phi (\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7) = 0 \quad (5)$$

L'objectif peut être maintenant exprimé en employant les rapports sans dimension Π_1 et Π_2 :

$$il \text{ faut maintenir } \Pi_2 = P_{out}/P_{ext} \text{ constant quand } \Pi_2/\Pi_1 = P_{in}/P_{out} > 1.$$

Cette démarche illustre bien la méthode du développement en X, car elle associe au problème réel une formulation abstraite sans dimension physique, où toutes les variables et nombres sont adimensionnels et donc peuvent être traités de façon équivalente dans un espace topologique doté d'une métrique, alors que ce n'était pas le cas du problème réel initial.

Passons maintenant au problème du choix du matériau du corps principal du régulateur de pression. La zone où la matière subit les contraintes mécaniques les plus importantes qui la déforment, est du côté de l'entrée, car c'est par-là qu'arrive le fluide sous la plus haute pression. L'étude porte sur une section droite de la tubulure d'admission. Une seconde analyse dimensionnelle est menée en vue d'abstraire le problème dont les éléments sont représentés sur la figure 3, et reportés dans le tableau 2. L'épaisseur de la tubulure est notée e , son diamètre D_{in} , δ sa déformation, θ est la température extérieure. Les caractéristiques du matériau sont : E son module de Young, ρ sa masse volumique, R_e sa résistance élastique limite, et α son coefficient de dilatation. Pour minimiser la perte de charge régulière, la section de l'écoulement est cylindrique circulaire.

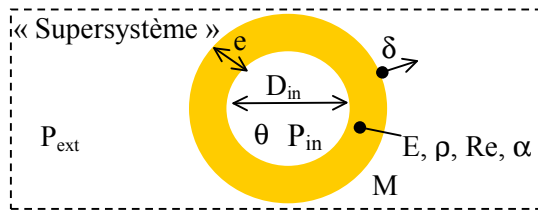


FIG. 3 – Section droite de la tubulure d'entrée.

	P_{ext}	P_{in}	θ	D_{in}	e	δ	M	E	ρ	Re	α
L	-1	-1		1	1	1		-1	-3	-1	
M	1	1					1	1	1	1	
T	-2	-2						-2		-2	
Θ			1								-1

Tableau. 2 – Analyse dimensionnelle de la tubulure.

Nous obtenons 7 nombres et variables sans dimension Π'_i à partir des 11 variables et paramètres initiaux.

$$\Pi'_1 = \frac{P_{ext}}{P_{in}} \quad \Pi'_2 = \frac{e}{D_{in}} \quad \Pi'_3 = \frac{\delta}{D_{in}} \quad \Pi'_4 = \frac{R_e}{P_{in}} \quad \Pi'_5 = \frac{E}{P_{in}} \quad \Pi'_6 = \frac{\rho D_{in}^3}{M} \quad \Pi'_7 = \alpha \theta$$

Nous appliquons une nouvelle fois le théorème de Vashy-Buckingham, d'où le système d'expressions (6).

$$\{\phi'(\Pi'_1, \Pi'_2, \Pi'_3, \Pi'_4, \Pi'_5, \Pi'_6, \Pi'_7) = 0 \quad (6)$$

Dans (6), deux expressions ont des formes qui peuvent être écrites aisément, l'une exprime la proportionnalité de la masse à l'épaisseur de matière, l'autre exprime que si la tubulure est peu épaisse sa déformation est proportionnelle à la pression interne. Cela mène au système (7) où seules ces deux expressions sont écrites sous des formes partiellement développées.

$$\left. \begin{aligned} \frac{e}{D_{in}} &= \frac{M}{\rho D_{in}^3} \varphi(\Pi'_1, \Pi'_3, \Pi'_4, \Pi'_5, \Pi'_7) \\ \frac{\delta}{D_{in}} &= \frac{D_{in} P_{in}}{e E} \psi(\Pi'_1, \Pi'_4, \Pi'_6, \Pi'_7) \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

En divisant l'une par l'autre, l'inverse de l'indice de performance d'Ashby E/ρ , utilisé dans le cas des enceintes sous pression de faible épaisseur, apparaît clairement, voir l'expression (8).

$$\frac{\delta}{D_{in}} = \frac{P_{in} \rho D_{in}^3}{E M} \frac{\psi(\dots)}{\varphi(\dots)} \quad (8)$$

La masse M est inversement proportionnelle à E/ρ , en maintenant toutes choses égales par ailleurs. De la même façon nous pouvons faire apparaître l'indice de performance Re/ρ dans une inégalité exprimant que la déformation réduite δ/D_{in} reste limitée au comportement élastique, en utilisant l'inverse du nombre Re/P_{in} . Les deux indices E/ρ et Re/ρ sont homogènes à L^2/T^2 , leur unité est le m^2/s^2 , ils ne peuvent être utilisés que dans l'espace matériel, soit la partie située sous la ligne du temps du schéma en X de la figure 1. Dans la méthode d'Ashby les indices de performance sont obtenus à partir de considérations phénoménologiques. Dans la méthode en X ils apparaissent combinés avec d'autres facteurs à l'issue de l'analyse dimensionnelle des grandeurs en jeu, à laquelle sont ajoutées des considérations sur leurs variations corrélées lors de phénomènes physiques. Les deux méthodes se rejoignent bien qu'empruntant des chemins très différents.

Le logiciel CES Edupack 2006 est employé pour illustrer la sélection des matériaux qui conviennent, opérée dans une base de données fournie avec celui-ci. Le périmètre de sélection est réduit aux matériaux ininflammables, supportant les rayons UV, dont le prix spécifique n'excédait pas 3€/kg en 2006. Le fluide est supposé être à une température maximale de 200°C, il peut contenir de l'eau et des solvants. L'objet corps est supposé compact, de faible dimension, le moulage est la technique d'obtention la plus économique en termes de matière prélevée dans l'environnement, d'énergie consommée et de temps d'usinage.

La figure 4 montre le résultat de la sélection en quatre étapes. La première consiste à indiquer les limites de prix spécifique et de variables d'état du contexte, les températures, etc., la seconde à indiquer le processus souhaité de fabrication, et la classe de forme de la pièce. Les deux suivantes sont des sélections graphiques qui utilisent les deux indices de performance vus plus haut. Sur la figure 4 les 247 nuances retenues dans la base de données de 2699 nuances de matériaux bruts apparaissent en couleur, celles écartées apparaissent en gris. Les performances vont en croissant depuis le coin bas droit du graphe vers le haut gauche, la droite oblique représente l'équipperformance $E/\rho = \text{constante}$. Les nuances sélectionnées n'appartiennent qu'à quatre familles : des alliages de magnésium, des alliages d'aluminium, des matériaux ferreux et des alliages de cuivre. Chacune a des propriétés physiques et chimiques différentes, plus ou moins adaptées aux fluides chargés d'ions ou corrosifs. Les entreprises qui produisent des régulateurs de pression emploient pour les corps, des nuances choisies au sein de ces familles, pour couvrir des contextes d'utilisation variés.

L'équipe qui conçoit va pouvoir dès lors travailler parallèlement à celle qui approvisionne (collecte) les matériaux bruts et outillages. L'algorithme de sélection des nuances précises parmi les 247 précédemment retenues, consiste à rechercher la plus grande performance au prix minimal, dans le respect des quantités et des délais compatibles avec le cycle de vie du produit (PLM, Product Lifecycle Management).

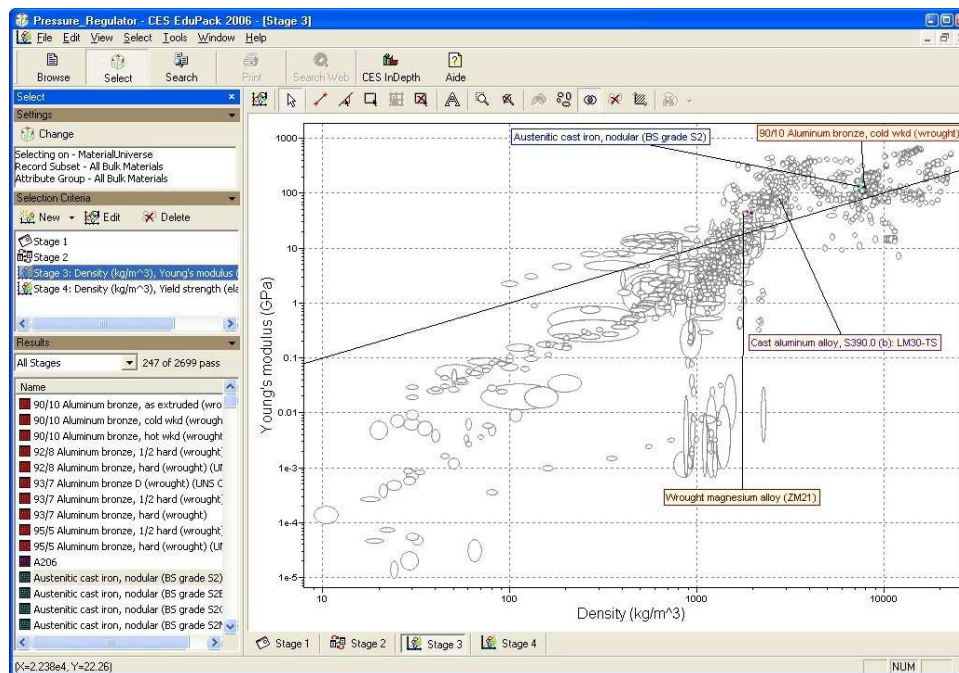


FIG. 4 – Choix de matériaux en utilisant le logiciel CES, graphe module de Young E versus densité ρ .

La conception peut être poursuivie par le choix du principe de fonctionnement de la solution, de son architecture, la définition des formes et des dimensions des pièces justifiées par quelques calculs lors lesquels les caractéristiques des matériaux sont nécessairement utilisées. À chaque étape et pour chaque partie, un « supersystème » peut être délimité et analysé selon la démarche proposée plus haut.

5 Conclusion

Dans cet article nous avons souhaité présenter l'application de la méthode de développement en X sur l'amorçage de l'étude d'un cas d'école. Pour qu'elle puisse être couramment appliquée, il faudrait que des bibliothèques d'environnements soient disponibles dans les logiciels de CAO-PLM, qui permettraient de délimiter rapidement les « supersystèmes » et d'en inventorier les paramètres et variables. Certains enchaînements pourraient être automatisés, toutefois l'analyse dimensionnelle demeure un exercice délicat.

Remerciements : nous remercions Eric Coatanéa et les membres de son groupe de recherche de l'université Aalto, pour les nombreuses discussions constructives qui nous ont aidées, ainsi qu'Amara Touil pour avoir œuvré au développement de la méthode dans le cadre d'une démarche d'ingénierie basée sur les modèles.

References

- [1] Ashby M.F., Materials selection in conceptual design, Mater Sci Tech 5 (6), 1989, p. 517–525.
- [2] Tahan M. et al., The X-development method, Crecos seminary, Aalto University, Helsinki, 2010.
- [3] Bashkar R. et Nigam A., Qualitative Physics Using Dimensional Analysis, Artificial Intelligence V45, n1-2, 1990, p73-111.
- [4] Zeng, Y., Environment-Based Formulation of Design Problem, Journal of Integrated Design and Process Science 8(4), 2004, pp. 45-63.
- [5] Coatanéa E., Conceptual modelling of life cycle design : a modelling and evaluation method based on analogies and dimensionless numbers, PhD Thesis, HUT; Espoo, 12 october 2005.
- [6] Roques P. et Vallée F., UML2 en action, de l'analyse des besoins à la conception, Eyrolles; 2007.
- [7] Altshuller G., Triz l'algorithme de résolution de problèmes innovants ARIZ-85-V, 1985, Altshuller Foundation.